

## 입자요소를 이용한 미세 성형 부품의 유한요소 해석 및 실험

구 태 완<sup>†</sup> · 강 범 수<sup>\*</sup>

(2002년 4월 16일 접수, 2002년 11월 15일 심사완료)

### FE Analysis and Experiments of Milli-Part Forming Using Grain and Grain Boundary Element

Tae-Wan Ku and Beom-Soo Kang

**Key Words:** Milli-Component(미세 부품), Grain Element(입자요소), Grain Boundary Element(입자 경계요소), FEM(유한요소법), Bending Process(굽힘 공정)

#### Abstract

The recent trend towards miniaturization causes an increased demand for parts with very small dimensions. Milli-structure components are classified as a component group whose size is between macro- and micro-scale. The manufacturing process of these components of thin sheet metal forming has a microscopic properties in addition to a typical phenomenon of bulk deformation because of the forming size. Also, the material properties and the deformation behavior change with miniaturization, which means that, a coarse grained materials show a higher resistance against deformation, when the grain size is in the range of the sheet thickness. In this study, a new numerical approach is proposed to simulate intergranular milli-structure in forming by the finite element method. The grain element and grain boundary element are introduced to simulate the milli-structure in the bending. The grain element is used to analyze the deformation of individual grain while the grain boundary element is for the investigation on the movement of the grain boundary. Also, the result of the finite element analysis is confirmed by a series of milli-sized forming experiments.

#### 1. 서론

최근 소형부품 제조 분야 뿐만 아니라 다른 분야에서도 고집적·고밀도화에 따라 점진적인 소형화 추세가 두드러지고 있으며, 동시에 경량화, 슬림(slim)화 및 대용량 고기능화로 이어지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 고생산성 및 재료의 고효율성으로 특징지어지는

기존의 성형 방법은 초소형 부품 생산에 동일한

성형공정으로 적용하기에는 아직까지 체계적인 연구결과가 없어 경험적인 방법이나 기존의 수치해석적 방법을 이용하여 제한적으로 적용하고 있다.<sup>(3,4)</sup> 소형부품은 미세조직적 특성(microscopic properties) 뿐만 아니라 전통적인 성형공정의 특성을 모두 지니고 있다.<sup>(5,6,7)</sup> 그러나, 오늘날의 미세성형(micro-forming)은 대부분이 각 부품 혹은 공정별로 경험자의 공정 설계에 의해 이루어지므로 그 장점을 적용할 수 있는 분야가 매우 제한적일 수밖에 없다. 수치적 해석방법 또한 일반적인 금속성형방법과는 달리 재료 유동(metal flow) 해석이나 금형 설계 방법 측면에서 미세성형 공정에 직접적으로 적용되기가 매우 어렵다.<sup>(8)</sup> 이는 크기효과(size effect)라고 하는, 크기에 의존하는

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 항공우주공학과

E-mail : longtw3315@lycos.co.kr

TEL : (051)510-1531 FAX : (051)512-4491

<sup>\*</sup> 회원, 부산대학교 항공우주공학과

미세성형시 발생할 수 있는 문제 해결을 위해 기존의 해석 방법만으로는 원활한 해석 과정 및 결과를 도출할 수 없기 때문이다. 미세성형시 발생하는 문제로는 최종 부품의 치수 정확성, 블랭크 홀터력 그리고 편치의 하중 등을 예로 들 수 있다. 이러한 문제들은 소재 두께와 입자크기(grain size) 사이의 비와 직접적인 관련이 있다. 소재의 두께가 감소하게 되더라도 입자의 크기는 변하지 않으며, 이때 각 입자들의 기계적인 특성은 소재의 재료 특성에 지배적인 영향을 미치게 된다. 이러한 현상을 타개하기 위한 방안의 하나로 성형해석 과정에서는 모델의 크기 효과를 고려함으로써 해결 방안을 모색할 수 있다.<sup>(9,10)</sup>

본 연구에서는 미세성형(milli-structure) 부품의 굽힘 공정에 있어서 거시적 성형 특성과 미시적 성형 특성을 동시에 가지는 소재의 성형 특성과 변형 부위에서 발생하는 특이한 변형 거동에 대한 연구를 유한요소 해석 기법과 시험을 통해 수행하였다. 비록 유한요소 기법이 소재의 변형에 대한 다양한 정보를 제공할 수 있더라도, 구형에 가까운 형태의 입자로 구성된 소재에서의 각각의 입자 거동에 대한 직접적인 해석이 불가능하다. 이러한 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 새로운 근사적 유한요소 모델을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시하고자 하는 유한요소 모델은 두 가지의 요소 형태로 구분되어질 수 있다. 그 중 하나는 각각의 입자가 소성변형을 표현할 수 있는 입자요소(grain element)로 소재의 입자 형태와 유사한 형상을 표현하기 위해 도입하였다.<sup>(11)</sup> 그리고, 또 다른 요소 형태로는 자유입자경계 전단, 압축 현상과 입자요소 간의 구조적 결합을 묘사하기 위하여 제시한 입자경계요소(grain boundary element)이다. 본 연구에서는 이들 입자와 소재의 미세조직적 입자경계 거동을 표현하기 위한 수치적 묘사는 입자요소와 입자경계요소의 물리적 메카니즘과 미세조직적인 거동을 가진다는 가정에 따른다.

본 연구에서 제안한 새로운 형태의 입자요소 및 입자경계요소를 유한요소 모델로 구성하여 0.4mm 두께를 가지는 소재에 스트립의 굽힘 공정을 포함하는 드로잉 성형 해석에 적용하였다. 해석과 실험의 결과는 각각의 입자들에 대한 변형 형상 비교를 수행하였으며, 시편의 두께방향의 미세조직 관찰을 통해 입자의 변형 형태를 조

사하여 유한요소 해석에서의 결과와 비교하였다.

## 2. 입자요소와 입자경계요소를 이용한 유한요소 모델의 수식화

미세조직적 측면에서 일련의 평면상에 나타나 는 소재의 입자 단면 형상과 유사한 형태를 구성하기 위해 육각형 형태의 입자들을 모델링하였다. 각각의 입자들은 일차적으로 소성변형을 나타낼 수 있는 입자요소들로 이루어진다. 그리고, 이 입자요소들은 입자들 사이의 전단 변형을 고려할 수 있도록 입자경계요소들로 결합되어, 이들의 조합에 의해 전체적인 유한요소 모델이 구성되게 된다. 각각의 입자요소는 Fig. 1(a)에서 보여지는 바와 같이 두 개의 사각요소를 이용하여 6개의 절점으로 이루어진다. 또한, 입자요소는 강소성 그리고 입자경계요소는 점탄성 거동을 따른다고 가정하였다.

### 2.1 입자요소의 유한요소 수식화

본 연구에서 Fig. 1(a)와 같은 입자요소의 변형 거동은 강소성 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 강소성 재료에 대한 범함수(functional)  $\Pi$ 는 다음과 같다.<sup>(12)</sup>

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV - \int_{S_r} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률 속도,  $\bar{t}_i$ 는 표면력,  $v_i$ 는 절점속도이다. 비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function),  $K$ 를 도입하면 위의 식 (1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \epsilon_v \delta \epsilon_v dV - \int_{S_r} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_v$ 는 체적 변형률 속도이다. 위의 식 (2)는 일반적인 유한요소 이산화 과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

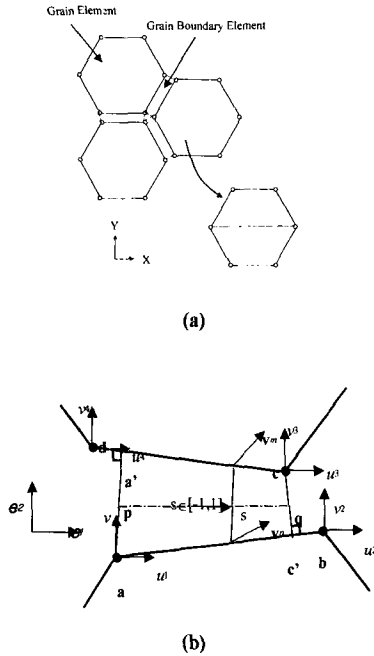


Fig. 1 Schematic diagram of grain element and grain boundary element

2.2 입자경계요소의 유한요소 수식화

미세구조물의 크기효과를 고려하기 위하여 각 입자를 유한요소 격자로 나타내는 입자요소를 도입하였다.<sup>(13,14)</sup> 일반적으로 금속재료는 많은 입자요소로 구성되어 있으며, 이러한 입자요소는 입자경계를 통하여 서로 연결되어 있다. 입자요소는 Fig. 1(a)와 같이 여섯 개의 절점으로 이루어져 있으며 그 주위는 입자경계요소로 연결되어 있다.

입자간의 상대 미끄럼(sliding)과 인장, 압축을 고려하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 입자경계요소를 도입하였다. 입자경계요소는 두 개의 접촉한 입자요소 사이에서 정의되며, 절점 c에서 이웃한 입자요소에 수직으로 연결한 점 c'과 절점 a에서 인접한 입자요소에 수직으로 연결한 점 a'로 네 개의 절점으로 구성된다. 선 aa', 선 cc'의 중점 p와 q를 연결한 국부좌표계인 (e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>)을 설정하여, 압축율(compression rate) α와 전단율(shearing rate) β를 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) \cdot \mathbf{e}_1 \tag{3}$$

$$\beta = (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n) \cdot \mathbf{e}_2 \tag{4}$$

여기서 v<sub>m</sub>, v<sub>n</sub>은 절점 a, b, c, d 에서 선형 보간하여 구해지는 속도이며, e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>는 국부좌표계의 단위 벡터이다.

압축율과 전단율은 비선형 점성과 유사한 구성방정식을 가지며, 입자요소의 강소성 구성방정식은 다르다. 그러나 압축율과 전단율의 구성식이 점탄성과 유사하기 때문에, 수치적 해석을 위하여 가상의 스프링을 고려하여 다음과 같은 구성식으로 근사화 하였다.

$$\dot{\sigma}_n = k_n(\alpha - \alpha_c) \tag{5}$$

$$\dot{\tau}_n = k_s(\beta - \beta_s) \tag{6}$$

여기서 k<sub>n</sub>은 수직방향의 탄성계수이고, k<sub>s</sub>는 전단방향의 탄성계수이다. 그리고, α<sub>c</sub>와 β<sub>s</sub>는 Onck 등이 제안한 각각의 수직방향과 전단방향의 보정상수이다.<sup>(13)</sup>

입자경계요소에 대한 지배방정식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있고, 이에 대한 입자경계요소의 일차 변분 범함수 δΠ<sub>GBE</sub>는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pi_{GBE} = \int_V [k_n(\alpha - \alpha_c) + k_s(\beta - \beta_s)] dV \tag{7}$$

$$\delta \Pi_{GBE} = \int_V (k_n \alpha \delta \alpha + k_s \beta \delta \beta) dV \tag{8}$$

식 (8)은 입자경계요소에 일반적인 유한요소 이산화 과정을 거쳐 속도가 미지수인 비선형 방정식이 된다. 이 식은 식 (2)와 마찬가지로 뉴턴-랩슨법에 의해 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법을 이용하여 구하였다.

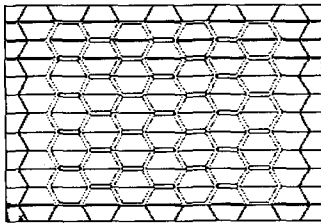
3. 입자요소와 입자경계요소를 이용한 굽힘 공정의 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델

앞서 언급한 입자요소 및 입자경계요소를 이용하여 유한요소 모델을 구성하였고, 이 유한요소

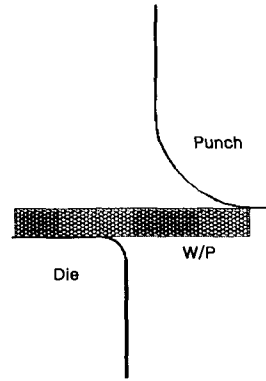
**Table 1** Mechanical properties of JIS-G-3141

Specifications	JIS-G-3141
Yield strength	158 MPa
Ultimate tensile strength	213 MPa
r-value	0.17
Stress-strain relation	$\bar{\sigma} = 537 \bar{\epsilon}^{-0.25}$ MPa

**Fig. 2** Basic mesh structure using grain element and grain boundary element

모델을 이용하여 미세성형 부품의 성형에 있어서 굽힘 공정의 유한요소 해석을 수행하였다. 본 유한요소 해석에 사용한 프로그램은 이번 연구를 통해 자체 개발한 2차원 유한요소 프로그램을 사용하였다. 본 연구에서의 굽힘 공정은 소형 사각 컵 드로잉 공정을 지니는 정사각형의 하우스징 케이스 부품을 대상으로 하고 있다. 실제 정사각 하우스징 케이스의 성형 공정은 블랭킹, 드로잉, 사이징, 피어싱 및 트리밍 공정 등 총 5 단계의 순차적 성형 공정으로 이루어진다. 그러나, 본 연구에서는 이들 5 단계의 공정 중에서 드로잉 공정 중의 일부를 평면변형(plane strain)으로 가정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석에 사용된 소재는 냉간압연강인 JIS-G-3141로 기계적 물성치는 Table 1에 나타내었다. Table 1에서의 기계적 물성치는 미세구조물 특성을 고려하기 위해 미세 인장실험을 통해 구한 값이다.<sup>(15)</sup> 또한, 성형 해석에 사용된 소재의 초기 박판 두께는 0.4t이며, 스트립(strip)의 치수는 30mm×0.4mm(폭×두께)이다. Coulomb 마찰 조건을 적용하였으며, 마찰계수는 0.12로 가정하였다.

Fig. 2는 입자요소와 입자경계요소의 초기 격자 구조를 보여주고 있다. 이러한 Fig. 2의 요소 격자를 이용하여 Fig. 3과 같은 유한요소 해석 모델을 구성하였다. Fig. 3의 유한요소 모델에서 사용된 입자요소의 수는 910개, 입자경계요소의 수는 1132개이다. 또한, 다이의 코너 반경은 0.4mm, 편

**Fig. 3** Initial FE model of bending process

치의 코너반경은 2mm로 모델링 하였다.

Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 성형 해석에 사용된 소재의 유한요소 모델에서 하나의 입자요소의 크기는 약 52  $\mu\text{m}$ 로, 소재의 두께방향으로 6개의 입자요소가 모델링 되었다. 입자요소의 개수가 6개라는 것의 의미는 하나의 입자요소는 두 개의 사각 요소의 조합으로 이루어지므로, Fig. 2에서와 같이 하나의 사각요소를 하나의 입자(입자의 크기 : 26  $\mu\text{m}$ , 실제 입자 크기 13.2  $\mu\text{m}$ 의 약 2배)라고 하고, 동시에 두 개의 사각요소인 두 개의 입자를 하나의 입자요소로 간주하여 Fig. 4에서와 같이 입자의 근사적 구형화를 수행한다. 결국 6개의 요소로 모델링 하는 것은 입자요소를 6개로 설정하는 것이고, 실질적으로는 12개의 입자가 두께방향으로 위치하게 된다. 또한, 두께 약 5  $\mu\text{m}$  정도의 입자경계요소가 입자요소를 둘러싸고 있도록 모델링하여 최종적으로 두께 방향의 총 두께는 0.4t를 만족시키도록 하였다. 상온에서의 냉간압연강인 JIS-G-3141의 평균 입자크기는 약 13.2  $\mu\text{m}$ 이지만, 유한요소 모델에서 하나의 입자의 크기를 52  $\mu\text{m}$ 로 그 크기를 약 4배로 설정한 이유는 본 연구에서 개발한 입자요소와 입자경계요소의 변형 양상을 4절에서 소개할 실험과의 비교를 수월하게 하며, 또한 부품의 소형화에 따른 크기효과를 고려하기 위해서이다.

입자경계요소의 수직(normal)·접선(tangential) 강성은 65MN/mm과 15MN/mm로 각각 가정하였다. 여기서 입자경계요소의 수직강성과 접선강성은 실험을 통하여 구해야 하지만, 아직까지 이를 측정·평가할 수 있는 실험법이 체계화되어 있지

못하며, 일반적으로 경험적인 방법 또는 탄성해석에서 얻은 결과를 이용하여 각 강성값을 구하기도 한다. 본 연구에서는 Otsu 등이 탄성해석에서 구한 강성값을 유한요소 해석에 이용하였다.<sup>(16,17)</sup>

3.2 입자요소와 입자경계요소를 이용한 유한요소 해석

Fig. 5는 드로잉 공정 중의 평면변형 거동으로 가정된 90° 굽힘 공정의 유한요소 해석 결과를 보여주고 있으며, 입자요소와 입자경계요소의 전체적인 변형 양상을 나타내고 있다. Fig. 5에서의 결과, 측벽부에서의 입자경계요소의 면밀한 관찰은 힘들지만 전반적으로 많이 찌그러진 것을 알 수 있다. 이는 측벽부에서의 변형 모드는 전단변형에 의한 영향을 주로 받고 있기 때문인 것으로 생각된다.

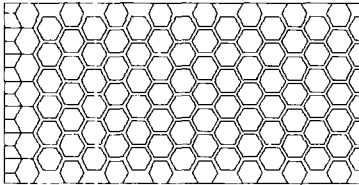


Fig. 4 Initial mesh system of bending process

또한, 좌측 바닥부의 변형 모드는 주로 인장 변형에 의한 변형을 주로 받고 있는 것으로 나타났다. Fig. 5에서 나타난 결과를 좀 더 구체적으로 관찰하기 위해 Fig. 6에서와 같이 네 부분을 확대하여 나타내었다. Fig. 6(a)는 Fig. 5에서의 좌측 바닥부를 확대한 것이고, Fig. 6(b)는 Fig. 5의 90° 굽힘 코너부를 나타내고 있으며, Fig. 6(c)는 Fig. 5의 우측 측벽부를 확대한 것이다. 그리고 Fig. 6(d)는 플랜지 부위를 확대한 것이다. Fig. 6(a)에서 바닥부에서의 소재변형은 펀치와 다이 사이에서 이루어지지만 약간의 인장 변형만 일어나고 있음을 알 수 있으며, 바닥부의 좌측에서 우

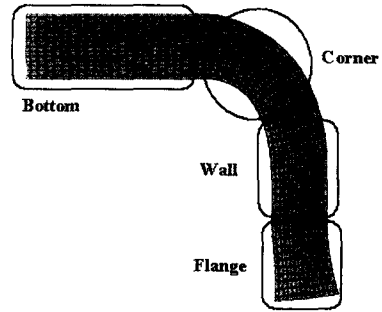


Fig. 5 Deformed configuration of FE simulation results

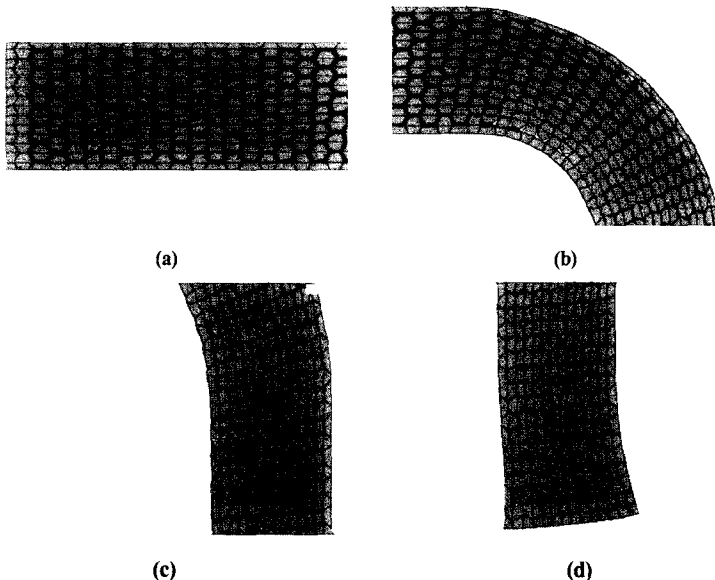


Fig. 6 Detail view of the represented deformation by grain element and grain boundary element : (a) bottom (b) corner (c) wall (d) flange

측으로 갈수록 입자요소는 인장 변형을 약간씩 더 받고 있는 것으로 나타났다. 바닥부에서의 입자요소의 평균적인 입자크기는 약  $59\ \mu\text{m}$  정도로 나타났다.

Fig. 6(b)이 나타내고 있는 코너부에서의 소재의 변형 거동은 소재의 길이 방향을 따라서는 인장 변형이 발생하고 있으며, 소재의 두께 방향으로서는 압축 변형을 받고 있다. 굽힘 코너부 안쪽에서는 입자경계요소가 상당한 정도의 찌그러짐 현상을 보이고 있는데, 이는 두께 방향으로의 압축 변형과 입자요소의 압축에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 또한 굽힘 코너부 바깥쪽에서의 변형 경향은 굽힘 공정의 유형적인 변형 형태를 보이는데, 입자요소와 입자경계요소가 압축 변형보다는 인장 변형에 의한 경향이 두드러지게 나타나고 있다. 측벽부와 플랜지부에서의 변형 양상은 Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)에서와 같이 입자경계요소가 과도하게 찌그러짐에 의해 두께가 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이 부위에서 발생하는 변형 모드는 입자경계요소의 변형을 유발하는 전단 변형과 인장 변형이 동시에 발생하고 있으며, 입자요소는 전단 변형과 입자요소들 간의 미끄러짐(sliding) 현상에 의해 약간의 회전 운동이 발생하여 심각하게 찌그러지는 현상을 보여주고 있다. 또한, 이 측벽부와 플랜지부에서의 입자요소의 평균적인 입자크기는 약  $91\ \mu\text{m}$ 였다.

기존의 유한요소 해석은 연속체 조건을 사용한 강소성 유한요소 해석에서 입자 및 입자경계는 재료의 유동식으로는 표현할 수 없다. 그러므로, 입자의 성장 및 변형 등은 응력, 변형을 등의 값으로부터 간접적으로 예측할 수밖에 없으며, 유동선 추적과 같은 후처리 기능을 이용하여 변형 형태를 예측할 수 있지만, 특히 입자간의 변형 거동은 정확한 해석이 불가능하다. 이에 반하여 앞서 언급한 바와 같이 입자요소 및 입자경계요소를 사용한 해석 결과에서는 굽힘 공정 후의 입자들과 입자경계들의 변형을 관찰할 수 있다. 입자요소와 입자경계요소를 이용한 굽힘 공정의 유한요소 해석 결과로부터 굽힘 공정이 진행되면서 입자 사이의 간격은 감소하게 되고, 입자는 굽힘이 진행되는 펀치의 운동방향으로 주로 변형하게 된다. 또한 입자 사이의 간격에서는 전단 변형이 주로 일어나는 부위에서 입자 사이가 많이 압축된 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 입자요소 및

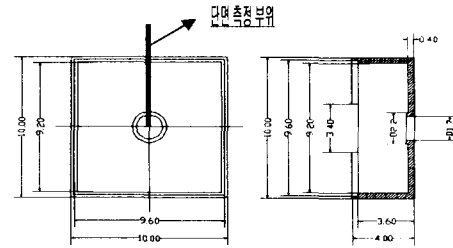


Fig. 7 Final product geometry(unit:mm)

입자경계요소를 사용한 해석에서는 입자 및 입자간의 변형 형태로도 굽힘 공정 전후의 소재 변형, 변형형태 등을 직접적으로 관찰할 수 있다. 만약 입자크기에 따른 입자경계의 강성을 정확히 평가할 수 있다면, 미세구조물과 같이 크기효과가 지배적인 제품에 대한 변형해석과 이에 따른 공정설계를 정확하게 할 수 있다. 그러나 입자만의 유동식과 입자 사이의 강성과 같은 상호작용에 대한 기계적 성질을 평가할 수 있는 실험방법이 정립되어 있지 않기 때문에 이에 따른 해석의 한계가 존재한다.

#### 4. 미세 박판의 성형 실험

##### 4.1 미세 박판 성형 실험

앞의 2절과 3절에서 소개한 입자요소와 입자경계요소의 수치적·유한요소 해석적 접근법의 타당성을 검증하기 위해서 평면 변형 굽힘 공정을 포함하고 있는 정사각 드로잉 부품의 성형 실험을 수행하였다. 본 실험에서의 몇몇 내용들은 이전의 실험 결과를 인용하였다.<sup>(18,19)</sup> 이전의 연구에서는 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 미세박판의 변형 형상을 미세단면 시험결과와의 비교를 수행하였으나, 본 연구에서는 2절 및 3절에서 제안한 입자요소와 입자경계요소를 이용하여 자체 개발한 유한요소 프로그램으로 해석을 수행하였다. 본 연구에서의 유한요소 해석 결과와의 비교를 위해 Fig. 7에서와 같은 부위의 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 7은 미세성형 부품인 정사각 하우징 케이스의 각 치수 및 최종 형상, 그리고 미세조직 측정 부위를 나타내고 있다. 미세성형 공정에 사용된 소재는 폭 30mm, 박판 두께 0.4mm인 스트립

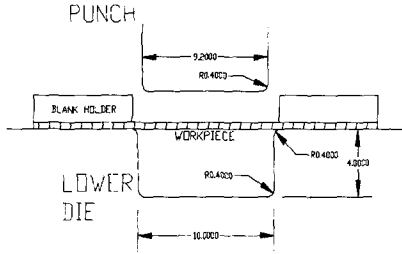


Fig. 8 A schematic diagram of punch and die (unit:mm)



Fig. 9 Progressive dies for the manufacturing of the rectangular housing case

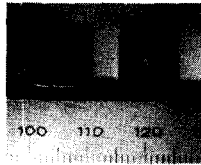


Fig. 10 Final product of the milli-scaled rectangular housing case

(strip)을 사용하였고, 다이의 공차는 편측 5%이다. Fig. 8은 미세 성형 실험을 위한 금형 치수를 간략하게 나타낸 것이고, 제작한 실제 프로그레시브 금형(progressive die)과 이를 이용하여 제작된 부품은 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다.

#### 4.2 성형 부품의 미세 조직 측정 실험

Fig. 7에 표시한 부분의 미세조직 관찰을 위해 단면의 미세조직을 SEM을 사용하여 촬영하였다. Fig. 7에서 측정 부위는 Fig. 5에서와 같은 바닥부, 코너부, 측벽부를 각각 촬영하였다. 미세 조직 관찰은 단면에서의 미세성형 전후에 나타나는 입자 크기의 변화와 입자 분포 측정을 위해서 수행하였다. 미세성형 실험으로부터 얻은 결과를 요약하면, Fig. 11의 초기 미세조직과 비교했을

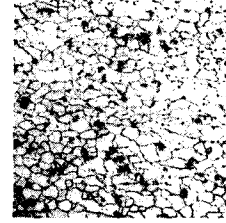


Fig. 11 Initial microphotographic configuration of material( $\times 400$ )

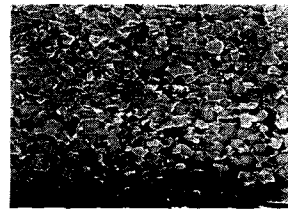


Fig. 12 Microphotograph of grain distribution at the bottom( $\times 400$ )

때, Fig. 12에서와 같이 바닥부에서의 미세조직의 변화는 거의 일어나지 않으나 펀치의 하중에 의해 입자가 약간의 압축 변형이 일어나기는 하지만 입자의 변형 형태를 보면 입자가 소재의 길이 방향으로 약간 늘어났음을 알 수 있었고, 성형 후의 입자의 크기가 초기 입자 크기인  $13.2 \mu\text{m}$  보다는 약간 커진  $14.4 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

또한, Fig. 13은 코너부에서의 소재의 입자의 변형 경향을 보여주고 있다. 코너부의 안쪽 미세조직을 나타내고 있는 Fig. 13(a)에서 보여지는 바와 같이 압축 변형으로 인한 입자의 구형화와 증첩화가 두드러지게 나타나고 있으나, Fig. 13(b)에서와 같은 코너부 바깥쪽 미세조직의 변화는 길이 방향으로 국소적 인장 변형이 발생하여 입자의 장대화가 일어났음을 보여주고 있다.

측벽부와 플랜지부에서의 변형 양상은 Fig. 14에서와 같이 입자의 조밀화 및 장대화가 두드러지게 나타나고 있다. 이 측벽부에서 발생하는 성형 과정에서의 현상은 전단 변형과 인장 변형이 동시에 발생하고 있으며, 입자들 간의 사이가 매우 조밀해지면서 소재의 길이방향으로 입자가 늘어나는 현상을 보여주고 있다. 그리고, 이러한 현상과 더불어 성형 과정 외적으로는 소재와 다이·펀치간의 마찰에 의한 영향도 어느 정도는 관련이 있을 것으로 생각된다. 측벽부와 플랜지

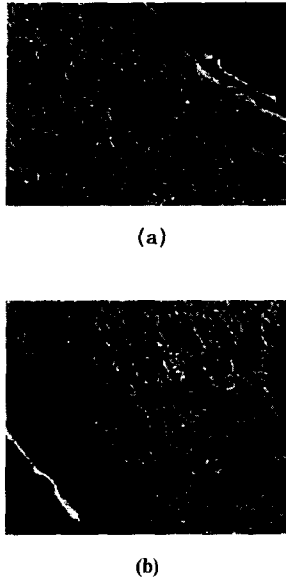


Fig. 13 Microphotograph of grain distribution at the corner( $\times 400$ )  
(a) internal corner (b) external corner



Fig. 14 Microphotograph of grain distribution at the wall( $\times 400$ )

부에서의 입자요소의 평균적인 입자크기는 약  $27.5 \mu\text{m}$  정도로 초기 입자 크기보다 약 2배 이상 증가된 결과가 나타났다.

## 5. 결 과

본 연구에서는 입자요소와 입자경계요소의 수치적 접근을 통해 미세 부품 성형을 위한 유한요소 해석을 수행한 결과 실제 소재의 미세조직적 거동을 유사하게 묘사할 수 있었다. 입자요소 및 입자요소계의 적용 타당성을 검증하기 위해 미세

박판의 굽힘 성형 해석 및 실험을 수행하여, 유한요소 해석과 실험의 결과를 비교하였다.

바닥부에서는 해석 결과인 Fig. 6(a)과 실험 결과인 Fig. 12로부터, 우선 입자요소 및 입자경계요소의 변형 경향은 펀치와 다이 사이에서 약간의 인장 변형만 일어나고 있음을 알 수 있고, 좌측에서 우측으로 갈수록 입자요소는 인장 변형을 약간씩 더 받고 있는 것으로 나타났다. 또한, 실험 결과에서는 미세조직의 변화는 거의 일어나지 않으나 펀치의 하중에 의해 입자가 약간의 압축 변형이 일어나기는 하지만 입자의 변형 형태를 보면 입자가 소재의 길이 방향으로 약간 늘어났음을 알 수 있었다. 전체적으로 입자의 인장 변형 모드가 나타남을 알 수 있었다. 성형 실험에서 입자의 크기가 초기 입자 크기인  $13.2 \mu\text{m}$  보다는 약간 증가된  $14.4 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 그리고, 해석 결과에서 입자요소의 평균적인 입자요소의 크기는 약  $59 \mu\text{m}$  정도로 관찰되었다. 여기서 언급되는 입자요소는 실제로는 4개의 입자로 구성된 하나의 입자요소로 가정하였기 때문에 입자 하나의 크기는 약  $14.75 \mu\text{m}$  정도의 크기를 가지게 된다. 그러므로, 전체적인 변형 경향과 입자의 크기 변화는 해석 결과와 실험 결과가 매우 유사하게 나타나고 있다고 할 수 있다.

코너부에서는 Fig. 6(b)과 Fig. 13에서와 같이 굽힘 코너부의 소재의 변형 거동은 소재의 길이 방향을 따라서는 인장 변형이 발생하고 있으며, 소재의 두께 방향으로서는 압축 변형을 받고 있다. 해석 결과로부터 굽힘 코너부 안쪽에서는 입자경계요소가 상당한 정도의 찌그러짐 현상을 보이고 있는데, 이는 입자의 구형화와 중첩화가 나타나는 성형 해석의 결과와 아주 흡사한 변형 거동을 보이고 있다. 그리고, 굽힘 코너부 바깥쪽에서는 해석 결과와 성형실험 결과 모두 굽힘 공정의 유행적인 입자의 장대화 현상이 나타나고 있음을 알 수 있었다.

측벽부에서의 변형 양상은 Fig. 6(c)와 Fig. 14에서와 같이 해석 결과와 마찬가지로 실험 결과에서도 전단 변형과 인장 변형이 동시에 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 입자의 장대화와 조밀화가 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 해석 후 입자의 크기는 약  $22.75 \mu\text{m}$ (입자요소의 변형 후 크기: 약  $91 \mu\text{m}$ )이지만, 실험 후 입자 크기는 약  $27.5 \mu\text{m}$ 로 다소간의 차이가 있다. 이는



앞서 언급했던 성형 실험시 외적인 요인인 마찰 조건에 대한 정확한 영향을 파악하지 못했기 때문인 것으로 생각된다.

그리고, 크기 효과를 고려하여 실제의 입자크기를 기준으로 4개의 입자로 이루어진 하나의 입자요소를 유한요소 모델의 기본 요소로 가정하여 유한요소 해석을 수행한 결과, 전반적으로 실험 결과와 유사한 변형 거동을 보이고 있다. 이는 입자요소 및 입자경계요소를 이용하여 미세 부품의 성형 해석에 적용할 경우, 입자의 크기 효과를 만족시키면서 성형 해석을 수행할 수 있다고 볼 수 있다.

## 6. 결 론

미세 구조물은 결정 소성학이나 입자 크기 등과 같은 미시적 특성과 기존의 금속 성형에서의 거시적 특성을 모두 가지고 있다. 거시적 특성을 해석하는 기존의 강소성(rigid-plastic) 유한요소법은 크기효과를 고려할 수가 없기 때문에 미시적 특성도 가지고 있는 미세구조물에 대한 정확한 해석이 불가능하다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 입자요소(grain element) 및 입자경계요소(grain boundary element)를 이용한 새로운 유한요소 해석 프로그램을 개발하여 굽힘 공정에 적용하였으며, 성형 실험을 통해 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 소재의 미세 조직을 이루고 있는 입자를 입자요소 및 입자경계요소로 묘사하여 유한요소 해석을 수행하였으며 이를 굽힘 공정 실험과 비교하였다.

(2) 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 유한요소 해석에서는 입자의 변형을 해석할 수 있었고 입자간의 변형 거동도 해석할 수 있었다.

(3) 입자요소 및 입자경계요소를 이용한 굽힘 해석에서 굽힘 후 재료내의 입자들이 실제 변형 거동과 유사한 변형을 하고 있음을 알 수 있었다.

(4) 입자경계요소의 변형거동을 나타내는 수직 강성과 접선강성 등에 대한 정확한 자료가 없어서 정확한 입자간의 변형거동은 해석할 수 없었으나, 실험적 방법과 해석적 방법을 이용하며 유효한 강성치를 얻는다면 정확한 입자간의 변형

거동을 해석할 수 있을 것으로 생각된다.

(5) 굽힘 해석과 실험 결과로부터 전체적인 변형 거동은 상호간에 아주 유사한 변형 거동을 가짐을 알 수 있었으며, 입자의 크기 변화 또한 만족할 만한 수준의 결과를 보이고 있다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2001-선도연구자지원-E00115), 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Geiger, M, Vollertsen F. and Kals, R, 1996, "Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Microparts," *Annals of the CIRP*, Vol. 45, pp. 272~282.
- (2) Tseng, A, 1990, "Material Characterization and Finite Element Simulation for Forming Miniature Parts," *Finite Element Anal. Des.*, Vol. 6, pp. 251~265.
- (3) Miyazaki, S, Fujita H. and Hiraoka, K, 1979, "Effect of Specimen Size on the Flow Stress of Polycrystalline Cu-Al. Alloy," *Scripta Met.*, Vol. 6, pp. 447~452.
- (4) Marumo, Y, Saiki H. and Onoue, A, 2001, "Effects of Lap Sheets on the Improvement of the Formability of Metal Foil," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 627~631.
- (5) Jimma, T. and Adachi, T, 1993, "Recent Trends in Precise Press-Working of Electronic Components," *Proc. of the 4th Int. Con. on Technology of Plasticity*, pp. 1547~1552.
- (6) Yoshito, M.N, 1979, "Influence of Microstructural Inhomogeneity on the Formability and Fracture of a Carbon Steel," *J. of Engineering Materials and Technology, Transaction of the ASME*, Vol. 101, pp. 18~21.
- (7) Ku, T.W. and Kang, B.S, "An Experimental Approach of Milli-Strucutre Sheet Metal Forming," *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting A*, pp. 471~476.
- (8) Messner, A, Engel, U, Kals R. and Vollertsen,

- F, 1994, "Size Effect in the FE- simulation of Micro-forming Processes," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp. 371~379.
- (9) Raulea, L.V, Goijaerts, A.M, Govaert, L.E. and Baaijens, F.P.T, 2001, "Size Effects in the Processing of Thin Metal Sheets," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 115, pp. 44~48.
- (10) Kals, T.A. and Eckstein, R, 2000, "Miniaturization in Sheet Metal Forming Working," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 103, pp. 95~101.
- (11) Ashby, M.F, 1972, "Boundary Defects and Automic Aspects of Boundary Sliding and Diffusional Creep," *Surface Science*, Vol. 31, pp. 498~504.
- (12) Kobayashi, S, Oh, S.I. and Altan, T, 1989, *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press.
- (13) Onck, P. and Giessen, E, 1997, "Micro-structurally Based Modeling of Intergranular Creep Fracture using Grain Elements," *Mechanics and Materials*, Vol. 26, pp. 109~126.
- (14) Onck, P. and Giessen, E, 1999, "Growth of an Initially Sharp Crack by Grain Boundary Cavitation," *J. of Mechanics and Physics of Solid*, Vol. 47, pp. 99~139.
- (15) Ku, T.W. and Kang, B.S, 2001, "An Experimental Approach of Milli-Structure Sheet Metal Forming and FE Analysis," *2nd Workshop on Milli-Structure Forming Technology*, pp. 117~123.
- (16) Otsu, M, Mori, K. and Osakada, K, 1996, "Determination of Optimum Working Conditions in Mushy-state Upsetting of Magnet using Distinct Element Simulation," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 691~696.
- (17) Iwashita, K. and Oda, M, 2000, "Micro-deformation Mechanism of Shear Bending Process Based on Modified Distinct Element Method," *Powder Technology*, No. 109, pp. 192~205.
- (18) Ku, T.W. and Kang, B.S, 2001, "An Experimental Approach and Finite Element Analysis on Rectangular Cup Drawing Process of Milli-Component Forming," *KSTP, Transactions of Material Processing*, Vol. 10, No. 6, pp. 471~477.
- (19) Ku, T.W, Hwang, S.M. and Kang, B.S, 2001, "Milli-Component Forming of Rectangular Cup Drawing," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 749~753.